ارائه رابطه تجربی جدید برای برآورد قابلیت فشردگی خاک‌های رسی تحکیم نیافته★

نادر عباسی[۱]

چکیده نشست ناشی از تحکیم خاک‌های ریزدانه یکی از مسائل مهم در طراحی‌های مربوط به سازه‌های مختلف عمرانی است. پتانسیل نشست تحکیمی خاک با ضریبی به نام شاخص فشردگی بیان می‌گردد. این تحقیق با هدف بررسی ارتباط مشخصات فیزیکی مختلف خاک با پتانسیل فشردگی آن و ارائه‌ی رابطه‌ی جدیدی برای تخمین منحنی فشردگی و شاخص فشردگی بر اساس مؤثرترین مشخصه‌ی فیزیکی انجام گرفته است. بدین منظور ابتدا نمونه‌های متعددی از مناطق مختلف کشور تهیه و آزمایش‌های مختلف شناسائی و آزمایش تحکیم یک بعدی بر روی آن‌ها با رطوبت‌های اولیه متفاوت انجام گرفت. سپس مقدار شاخص فشردگی برای هر یک از نمونه های آزمایشی، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نیز با استفاده از روابط تجربی موجود تعیین گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS آنالیز همبستگی و رگرسیون بر روی داده‌های به‌دست آمده صورت گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این بررسی‌ها مشخص گردید که روابط تجربی مبتنی بر مشخصه‌های مبین وضعیت ساختمان اولیه‌ی نمونه‌ی نظیر، نسبت پوکی، وزن واحد حجم و رطوبت اولیه از دقت و کارایی بیش‌تری نسبت به سایر روش‌های موجود در تعیین شاخص فشردگی برخوردار است. هم‌چنین در این پژوهش یک رابطه‌ی تجربی یک‌متغیره بر اساس وزن واحد حجم خشک خاک برای برآورد منحنی فشردگی و شاخص فشردگی خاک پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی شاخص فشردگی، تحکیم، نشست، منحنی فشردگی، وزن واحد حجم خشک.

A New Empirical Equation for Compression Behavior of Unconsolidated Clayey Soils

N. Abasi

Abstract *Compressibility characteristics of fine-grained soils are often the most important parameters for settlement evaluation of the founded layers. The compression index which is the slope of virgin curve is usually for determination of settlement potential of fine grained soils. In this research, the effects of different physical and index properties of soil samples were investigated on compression index in order to find the most compatible properties and reliable equation based for a wide range of soil samples collected from different sites of Iran. For this purpose, one-dimensional consolidation tests were conducted utilizing conventional oedometer test on 26 soil samples at three different levels of void ratio. The compression index of each specimen was determined using data obtained from test results and correlation analysis was made using statistical software, SPSS. The results showed that the compression index, C_c, has a significant correlation with the most of index properties where its coefficient of correlation with structural properties was strongly greater than those related to inherent properties. Therefore the empirical equations which do not consider at least one structural parameter and use only intrinsic properties could not estimate the compression index properly. Furthermore a very simple and reliable equation was developed for estimation of the compression index and virgin curve of unconsolidated and normally consolidated fine-grained soils. Statistical analysis demonstrated that the proposed relationship predicts the compression index accurately in comparison with the existing relationships.*

Key Words Consolidation, Compression index, Settlement, Compression line, Empirical Equation

---

★تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۹/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۸/۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار مؤسسه‌ی تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

مقدمه

ارزیابی رفتار فشردگی خاک‌های ریزدانه و تعیین مقدار فشردگی ایجاد شده در خاک‌های ریزدانه در اثر افزایش تنش ناشی از بارگذاری، و به عبارت دیگر تعیین مقدار نشست حاصل از تحکیم اولیه یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. پتانسیل نشست تحکیمی یک خاک بستگی به خصوصیات خاک و تاریخچه‌ی تنشی آن دارد و برای یک خاک معین با ضریبی به نام شاخص فشردگی (C_c) بیان می‌گردد. این ضریب که همان شیب منحنی تغییرات نسبت پوکی (e) نسبت به لگاریتم تنش مؤثر (منحنی فشردگی) است، معمولاً با انجام آزمایش تحکیم و تحلیل نتایج حاصل از آن به‌دست می‌آید. با توجه به این‌که آزمایش تحکیم بسیار وقت‌گیر و پر هزینه است و شرایط تهیه‌ی نمونه‌ی آزمایشی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نتایج به‌دست آمده دارد، محققان در طول سال‌های اخیر سعی نموده‌اند تا تأثیر عوامل مختلف بر منحنی تنش مؤثر- نسبت پوکی را شناسایی و آن را به‌نحوی با استفاده از مشخصات فیزیکی خاک و بدون انجام آزمایش برآورد نمایند. در این راستا روابط متعددی براساس خواص فیزیکی خاک‌ها نظیر حد روانی، رطوبت طبیعی نمونه، نسبت پوکی اولیه در محل، وزن واحد حجم خشک، دامنه‌ی خمیری و نسبت پوکی در حد روانی برای تخمین شاخص فشردگی ارائه گردیده است.

لمب و ویتمن [1] نشان دادند که تغییرات نسبت پوکی نسبت به تنش مؤثر در خاک‌های عادی تحکیم یافته الزاماً خطی است. به‌طوری‌که خاک‌های با خاصیت خمیری بیش‌تر دارای شاخص فشردگی بیش‌تر هستند و به ازای یک تنش معین از نسبت پوکی بیش‌تری برخوردارند. برلند [2] رفتار تحکیمی چند خاک رسی با خاصیت خمیری‌های مختلف را در شرایط بازسازی‌شده بررسی کرد و نشان داد که شکل عمومی تغییرات نسبت پوکی با تنش مؤثر برای همه‌ی خاک‌ها به‌صورت خطی با اندکی تحدب به بالا است. به‌طوری‌که به‌ازای یک تنش معین مقدار نسبت پوکی برای خاک‌ها متفاوت است و با افزایش حد روانی افزایش می‌یابد. هم‌چنین برای دو نوع خاک که دارای حد روانی تقریباً یکسان ولی مقدار نسبت پوکی در حد روانی متفاوت بوده‌اند (به‌علت تفاوت در مقدار توده‌ی ویژه)، تفاوت محسوسی در رفتار فشردگی آن‌ها وجود دارد. سوشیدا [3] نشان داد تغییرات نسبت پوکی نسبت به تنش مؤثر به‌ازای رطوبت دو برابر حد روانی به‌صورت یک خط مستقیم است و در رطوبت‌های بیش‌تر و کم‌تر از آن حالت تقعر و تحدب دارد. شریدهاران و ناگاراج [4]، تحقیقات جامعی برای یافتن رابطه‌ای مناسب برای شاخص فشردگی انجام داده‌اند. آن‌ها ۱۰ نمونه خاک رسی طبیعی با محدوده‌ی وسیعی از حد روانی تهیه و آزمایش‌های مقدماتی نظیر دانه‌بندی، حدود آتربرگ و کانی‌شناسی بر روی آن‌ها انجام دادند و نشان دادند که شاخص فشردگی خاک‌ها رابطه‌ی خوبی با شاخص انقباض دارد.

شریدهاران و پراکاش [5] بیان کردند که منحنی تغییرات نسبت پوکی نسبت به لگاریتم تنش مؤثر خاک‌های رسی تابع مقدار رطوبت اولیه‌ی نمونه می‌باشد. بدین ترتیب که بسته به مقدار رطوبت اولیه منحنی‌های متعددی برای یک نمونه خاک وجود دارند که این منحنی‌ها در محدوده‌ی دو منحنی حدی بالائی و پایینی قرار دارند. بو و همکاران [6] بیان کردند که رفتار فشردگی خاک‌های رسی خیلی نرم، قابل ارزیابی با تئوری‌های مرسوم که شیب یکتایی برای تغییرات نشست نسبت به تنش موثر در نظر می‌گیرند، نبوده‌است و نشان دادند که منحنی تغییرات نسبت پوکی نسبت به تنش مؤثر دارای سه شیب متفاوت است. به‌عبارت دیگر برای یک خاک رسی خیلی نرم، بسته به محدوده‌ی تنش سه نوع ضریب فشردگی وجود دارد. در تحقیقات متعدد دیگری نیز از رابطه‌ی خطی برای بیان رابطه‌ی بین نسبت پوکی و شاخص فشردگی استفاده شده است [7, 8]. یون [9] رابطه‌ی بین شاخص فشردگی و مشخصات فیزیکی خاک‌های

رسی سواحل کره را مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که روابط تجربی ارائه‌شده در مراجع قابل استفاده برای خاک‌های رسی سواحل کره نمی‌باشند و تنها روابطی که متکی بر درصد رطوبت طبیعی خاک هستند می‌توانند شاخص فشردگی را با دقت مناسب پیش‌بینی نمایند. هم‌چنین در این تحقیق سه نوع رابطه‌ی تجربی مختلف و سه متغیره (با استفاده از سه فاکتور رطوبت اولیه، نسبت پوکی و حد روانی) برای خاک‌های رسی شرق، جنوب و غرب شبه‌جزیره‌ی کره ارائه داده‌اند. سراتو و لوتنگر [10] نشان دادند که منحنی فشردگی برای یک خاک منحصر به فرد نیست و با توجه به مقدار رطوبت اولیه‌ی نمونه‌ی آزمایشی، متفاوت است. پارک و کوموتو [11] کمیت فیزیکی تخلخل اولیه‌ی خاک (n_0) را مناسب‌ترین کمیت فیزیکی برای تخمین شاخص فشردگی معرفی نمودند.

نث و دیدلال [12] با استفاده از رگرسیون خطی رابطه‌ی بین مشخصات فیزیکی خاک را شامل نسبت پوکی، حد روانی و دامنه‌ی خمیری با شاخص فشردگی بررسی و نتیجه‌گیری نمودند که رابطه‌ی خطی شاخص فشردگی با دامنه‌ی خمیری از دقت بیش‌تری برخوردار است. رائو و همکاران [13] با بررسی تأثیر مشخصات مختلف فیزیکی بر مقدار شاخص فشردگی بیان کردند که وزن مخصوص خشک و حد روانی بیش‌ترین تأثیر را بر مقدار شاخص فشردگی دارند. اوزر و همکاران [14] ضمن بررسی کارایی روش‌های تجربی موجود، رابطه‌ی یک متغیره (بر اساس نسبت پوکی اولیه) ارائه‌شده توسط آزوز و همکاران [15] را مناسب‌ترین روش برای تخمین شاخص فشردگی خاک‌ها معرفی نمودند. آن‌ها هم‌چنین با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۳۵ نمونه خاک مدلی را بر اساس شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تعیین شاخص فشردگی ارائه دادند.

تنوع روابط تجربی ارائه شده بیانگر این حقیقت است که هنوز این روابط از دقت و قابلیت اعتماد مناسبی برخوردار نیستند و هر کدام برای شرایط خاصی قابل کاربرد هستند. به‌طوری‌که برخی محققان روابط پیشنهادی خود را برای خاک‌های مناطق خاصی توصیه نموده‌اند. در این پژوهش ابتدا چگونگی تأثیر مشخصات فیزیکی مختلف خاک‌ها در منحنی فشردگی و مقدار شاخص فشردگی مورد مطالعه قرار گرفته و کارایی روابط تجربی موجود ارزیابی گردیده است. هم‌چنین به‌منظور ارائه‌ی رابطه‌ی تجربی جدید متناسب با خاک‌های ایران، بررسی‌های تحلیلی و آماری انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

تهیه‌ی نمونه‌های خاک. به‌منظور بررسی و ارزیابی نقش مشخصات فیزیکی خاک‌های ریزدانه بر مشخصات و رفتار تحکیمی آن‌ها، اقدام به تهیه‌ی ۲۶ نمونه خاک طبیعی از مناطق مختلف کشور شامل استان البرز (نظرآباد، هشتگرد، کرج)، استان قزوین (آبیک، تاکستان، اقبالیه) استان اردبیل (مسیر کانال اصلی خدا آفرین)، استان خوزستان (آبادان، شادگان، شوشتر، بهبهان) و اصفهان، با مشخصات فیزیکی و شیمیایی متفاوت گردید. در انتخاب آن‌ها سعی گردید که نمونه‌های انتخاب‌شده دارای خواص خمیری متفاوتی باشند. بدین منظور از مقدار حد روانی که متأثر از خصوصیات مختلف فیزیکی و شیمیائی خاک می‌باشد، به‌عنوان معیار انتخاب استفاده گردید. به‌طوری‌که نمونه‌های انتخاب‌شده دارای حد روانی متنوعی از ۲۳ درصد الی ۷٤ درصد بوده‌اند. نمونه‌ها پس از انتخاب به آزمایشگاه منتقل و مورد آزمایش‌های شناسائی شامل دانه‌بندی، تعیین حدود آتربرگ، تراکم و طبقه‌بندی مطابق استاندارد [16] قرار گرفتند. جدول شماره‌ی (۱) مشخصات فیزیکی نمونه خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

آزمایش تحکیم یک‌بعدی

در این تحقیق مشخصات تحکیمی نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از روش B آزمایش تحکیم استاندارد (ASTM D 2435-96) که طی آن نمونه در جهت جانبی محصور شده و تغییر شکل و زه‌کشی نمونه فقط

در امتداد قائم صورت می‌گیرد، تعیین گردیدند. در این آزمایش مقدار تغییرشکل نمونه که معمولاً با نسبت پوکی ارزیابی می‌گردد، نسبت به تنش‌های اعمال شده و هم‌چنین نسبت به زمان به‌ازای هر افزایش تنش قرائت و یادداشت می‌گردد. سپس با ترسیم منحنی تغییرات نسبت پوکی در مقابل لگاریتم تنش مؤثر (منحنی فشردگی)، مقدار شاخص فشردگی که همان شیب این منحنی می‌باشد، تعیین می‌گردد. با توجه به این‌که خواص مهندسی خاک‌ها از جمله شاخص فشردگی تابع دو گروه از عوامل شامل؛ عوامل ترکیبی (شامل نوع و مقدار کانی‌های تشکیل‌دهنده، شکل، اندازه و نحوه‌ی توزیع اندازه‌ی ذرات و هم‌چنین مشخصات شیمیایی آب منفذی) و عوامل محیطی (میزان رطوبت، وزن واحد حجم، نسبت پوکی و ساختمان خاک) است، در انجام آزمایش تحکیم سعی گردید تأثیر هر دو گروه از عوامل ذکرشده مورد توجه قرار گیرد. بدین صورت که هر یک از خاک‌های مورد بررسی در سه مقدار نسبت پوکی اولیه متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد بررسی

شماره‌ی نمونه	بافت (%)			مشخصات تراکمی		حدود آتربرگ		طبقه‌بندی USCS
	رس	سیلت	ماسه	رطوبت بهینه %	دانسیته خشک ماکزیمم gr/cm^3	حد روانی %	حد خمیری %	
۱	۲۸	٤۸	۲٤	۱۷	۱/۷٥	۳۱	۲٤	ML
۲	۲٥	٤۷	۲۸	۱۷/٥	۱/۸۱	۲۹	۲۰	CL
۳	۳٥	۳۹	۲٦	۱۹/٥	۱/۷۲	۳٤/٥	۲۰	CL
٤	۳۰	۳۸	۳۲	۱۹/٦	۱/۷٤	۳٦	۲۳/٥	CL
٥	۱٦	٥٤	۳۰	۱٥	۱/۸٤	۲۲/٥	۲۱	CL
٦	۲۸	٤۸	۲٤	۱۸/٥	۱/۷٥	۳۲/٥	۲۲	CL
۷	۱۸	٦۷	۱٥	۱۹/۷٥	۱/۷٤	۳۱	۱۹/۷	CL
۸	٤۹	۳٥	۱٦	۲٥/٥	۱/٥٥	۷۰	۲۸	CH
۹	۳۳	٦۱	٦	۲۱/۲	۱/٦٦	٤٦	۲٥	CL
۱۰	٥۰	٤۲	۸	۲٤	۱/٦	٥٤	۲۳	CL
۱۱	٤٦	٤۳	۱۱	۲٥/٥	۱/٤۸	٦٤	۳۱	CH
۱۲	٤۸	٤٥	۷	۲٥/۷	۱/٥۳	٥۷	۲٦	CH
۱۳	۳۸	٥۰	۱۲	۲۱/٤	۱/٦۷	۳۸	۲٦	CL
۱٤	۳٤	٤۱	۲٥	۱۹	۱/۷۱	۳٥	۲۲/٥	CL
۱٥	٤۹	٤۹	۲	۲۲	۱/٦٤	٥٦	۲۷	CH
۱٦	۳٦	٦۳	۱	۱۸	۱/۷٦	۳٤	۲۰/۲	CL
۱۷	۲٦	٦۲	۱۲	۲۰	۱/٦۸	۳۷	۲٥	CL
۱۸	۳۲	٥۲	۱٦	۱۷/٥	۱/۸۱	۳۰	۱۸	CL
۱۹	٤٤	٥٦	۰	۲۲/۲٥	۱/٦٤	٤۰	۲۳	CL
۲۰	۲٤	۷۲	٤	۱۹	۱/۷	۳۱	۲۲	CL
۲۱	۲۳	٦٦	۱۱	۲۲/۲	۱/٦۲	٤۱/٥	۲٦/٥	ML
۲۲	۱۷	۷٦	۷	۱٥	۱/۸۲	۲٤/٥	۲۳	CL-ML
۲۳	٤۸	٥۲	۰	۱۹	۱/٦۷	٤۰	۲۲	CL
۲٤	۲٦	٦۷	۷	۱۷	۱/۷۳	۳۱	۲۰	CL
۲٥	۲٥	٦۲	۱۳	۱۷	۱/۷۹	۳۰	۲۰/۲	CL
۲٦	۲۸	٥۷	۱٥	۲۰	۱/٦۷	۳٤	۲۳	CL

ساخت نمونه‌های آزمایشی

با توجه به این‌که خاک‌ها بسته به مقدار حد روانیشان با رطوبت‌های متفاوتی به یک حد معینی از نسبت پوکی و یا وضعیت مقاومتی می‌رسند، لذا در این پژوهش برای ایجاد مقادیر مختلف نسبت پوکی اولیه از نسبت رطوبت اولیه به حد روانی ($\frac{\omega}{LL}$) استفاده گردید. به طوری‌که هر یک از خاک‌ها با سه وضعیت اولیه‌ی متفاوت شامل رطوبت‌های اولیه ۱/۲ ، ۰/۸ و ۰/۵ برابر حد روانی آن‌ها تهیه گردیدند. در هر یک از نسبت‌های مذکور مقادیر رطوبت و نسبت پوکی اولیه‌ی نمونه‌ها محاسبه و مورد استفاده قرارگرفتند. نمونه‌های گروه اول با رطوبت اولیه حدود ۱/۲ برابر حد روانی آن‌ها به صورت دوغاب بودند و به راحتی داخل سلول نمونه روی دستگاه ریخته شدند. های گروه دوم که دارای رطوبتی بیش از حد خمیری (و کم‌تر از حد روانی) بودند، داخل رینگ نمونه بدون اعمال هرگونه فشاری قرار داده شدند. لذا در هر دوحالت مذکور، نمونه‌ها هیچ‌گونه تنشی را تجربه نمی‌کنند و کاملاً تحکیم‌نیافته محسوب می‌گردند. نمونه‌های گروه سوم نیز پس از محاسبه‌ی وزن نمونه‌ی مرطوب مورد نیاز (به‌ازای حجم رینگ تحکیم) جهت حصول نسبت پوکی معین با رطوبت معادل ۵۰ درصد حد روانی ($\frac{\omega}{LL}=0.5$) در داخل رینگ با استفاده از نیروی تراکمی قالب‌گیری شدند. با این وجود، فشار مورد استفاده در ساخت این نمونه‌ها به‌مراتب کم‌تر از تنش‌های اعمال شده در آزمایش تحکیم بوده‌اند به‌طوری‌که می‌توان این نمونه‌ها را نیز عادی تحکیم‌یافته محسوب کرد. شکل شماره‌ی (۱) دستگاه‌های تحکیم مورد استفاده در این پژوهش و حالت نمونه‌ی آزمایشی تهیه‌شده با رطوبت اولیه‌ی حدود ۱/۲ برابر حد روانی را نشان می‌دهد.



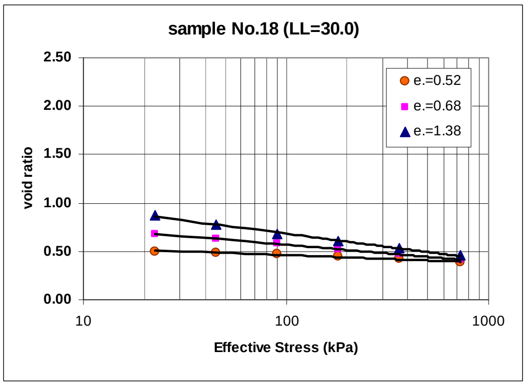
شکل ۱ دستگاه‌های تحکیم مورد استفاده و نمونه‌ی آزمایشی با رطوبت اولیه‌ی بیش از حد روانی

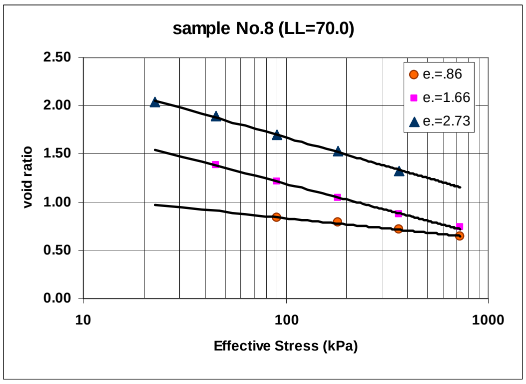
نتایج و بحث

تعیین مشخصات منحنی فشردگی نمونه‌ها. با استفاده از نتایج به‌دست آمده از آزمایش تحکیم، منحنی‌های تغییرات نسبت پوکی در مقابل تنش مؤثر (منحنی فشردگی) برای هر یک از نمونه‌های آزمایشی ترسیم گردیدند. شکل شماره‌ی (۲) نمونه‌ای از این منحنی‌ها را برای خاک شماره‌ی (۸) (با حد روانی ۷۰ درصد) و خاک شماره‌ی (۱۸) (با حد روانی ۳۰ درصد) با سه وضعیت نسبت پوکی اولیه‌ی متفاوت نشان می‌دهد. همان طوری که از شکل ۲ قابل ملاحظه است با توجه به این‌که نمونه‌های آزمایشی مورد استفاده به‌صورت دست‌خورده و بدون ایجاد شرایط پیش‌تحکیمی تهیه گردیده بودند، منحنی‌های فشردگی به‌دست آمده در اغلب موارد با ضریب تبیین (r^2) بزرگ‌تر از ۰/۹۵ خطی بودند. تنها ضرایب این خطوط یعنی شیب و عرض از مبدأ آن‌ها بسته به نوع خاک و نسبت پوکی اولیه‌ی آن‌ها متفاوت بود. بدین ترتیب که با افزایش مقادیر حد روانی و نسبت پوکی اولیه، شیب و عرض از مبدأ خط نیز افزایش می‌یابند. به‌طوری‌که برای کلیه‌ی نمونه‌های آزمایشی، برای بیان چگونگی تغییرات نسبت پوکی به‌ازای تنش مؤثر می‌توان معادله‌ی عمومی زیر را ارائه نمود:

$$e = e_1 - C_c \log p \qquad (١)$$

که در آن C_c شیب منحنی فشردگی است که شاخص فشردگی نامیده می‌شود و e_1 مقدار عرض از مبدأ خط بوده و از نظر فیزیکی مقدار نسبت پوکی به‌ازای تنش واحد (P=1 kPa) است. پس از ترسیم تغییرات نسبت پوکی به‌ازای لگاریتم تنش (e-LogP)، به‌ازای هر یک از نمونه‌های آزمایشی، مشخصات خطوط به‌دست آمده یعنی مقادیر شیب (C_c) و عرض از مبدأ (e_1) آن‌ها تعیین گردیدند که نتایج به‌دست آمده در جدول (۲) ارائه گردیده‌اند. با توجه به جدول مذکور می‌توان دریافت که برای یک نمونه خاک با مشخصات خمیری معین، ضرایب e_1 و C_C با افزایش مقدار رطوبت اولیه و یا نسبت پوکی افزایش می‌یابند. همچنین خاصیت خمیری خاک نیز در این ضرایب مؤثر است. به‌طوری‌که با افزایش حد روانی خاک، مقادیر این ضرایب افزایش می‌یابند.





شکل ۲ نمونه‌ای از منحنی‌های نسبت پوکی – تنش مؤثر با سه مقدار نسبت پوکی اولیه‌ی متفاوت

تعیین تأثیر مشخصات فیزیکی نمونه‌ها بر رفتار فشردگی خاک‌ها

در این پژوهش به‌منظور تعیین مقدار تأثیر پارامترهای مختلف خاک بر رفتار فشردگی خاک، آنالیز همبستگی بین مقدار ضرایب منحنی فشردگی (شاخص فشردگی و عرض از مبدأ) و مشخصات فیزیکی مختلف خاک‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. بسته‌ی نرم‌افزاری SPSS یکی از برنامه‌های کاربردی در زمینه‌ی تجزیه و تحلیل‌های آماری نظیر محاسبه‌ی شاخص‌های آماری، انجام آنالیز واریانس‌های مختلف،

مقایسه‌ی میانگین، برازش انواع مختلف رگرسیون، تعیین همبستگی بین داده‌ها و... است. در این پژوهش آنالیز همبستگی بین مشخصات مختلفی نظیر حد روانی (LL) ، حد خمیری (PL)، حد انقباض (SL)، رطوبت اولیه‌ی نمونه (ω_0) ، نسبت پوکی اولیه (e_0)، وزن واحد حجم خشک (γ_d)، دامنه‌ی خمیری (I_p)، شاخص انقباض (I_s)، نسبت پوکی در حد روانی (e_L)، چگالی ذرت جامد خاک (G_s) نسبت پوکی در حد خمیری (e_p)، رطوبت بهینه (ω_{opt})، دانسیته ماکزیمم (γ_{max})، درصد رس (clay)، عدد فعالیت رس (A) و شاخص فشردگی (c_c) استفاده گردید. سپس ضریب همبستگی هر یک از مشخصه‌ها با ضرایب منحنی فشردگی یعنی e_1 (عرض از مبدأ) و C_C (شاخص فشردگی) تعیین گردید. جدول شماره‌ی (۳) ضریب همبستگی برخی از این مشخصات فیزیکی با یکدیگر و با شاخص فشردگی را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول مذکور ملاحظه می‌شود مقدار شاخص فشردگی و عرض از مبدأ خط فشردگی با اغلب مشخصه‌های مورد ارزیابی، همبستگی معنی‌داری دارد ولی مقدار ضریب همبستگی به‌ازای مشخصه‌های مختلف متفاوت است. به‌طوری‌که مقدار ضریب همبستگی شاخص فشردگی و عرض از مبدأ خط با مشخصه‌های وزن واحد حجم خشک (γ_d)، نسبت پوکی اولیه (e_0) و رطوبت اولیه (ω_0) بزرگ‌تر از ۰/۹ و به‌مراتب بیش‌تر از مقدار همبستگی این ضرایب با سایر مشخصات فیزیکی است. هم‌چنین مقدار همبستگی شاخص فشردگی با سایر مشخصات فیزیکی که به نوعی با جنس ذرات و خاصیت خمیری آن‌ها در ارتباط هستند تقریباً یکسان و حدود ۰/۵ می‌باشد. به‌طور کلی اگر کلیه‌ی مشخصات فیزیکی خاک‌ها به دو گروه شامل مشخصات مرتبط با جنس ذرات (خواص خمیری، درصد ذرات رس، عدد فعالیت و ...) و مشخصات مرتبط با ساختمان اولیه‌ی نمونه (وزن واحد حجم ، نسبت پوکی اولیه و رطوبت اولیه) تقسیم‌بندی شوند، می‌توان نتیجه گرفت که اولاً شاخص فشردگی خاک‌ها با هر دو گروه همبستگی معنی‌داری دارد و ثانیاً مقدار همبستگی با مشخصه‌های مرتبط با ساختمان اولیه‌ی نمونه‌ها به‌مراتب بیش‌تر است.

ارائه‌ی رابطه‌ی تجربی جدید برای برآورد منحنی فشردگی و تعیین شاخص فشردگی

همان‌طوری که از جدول (۳) قابل ملاحظه است، در این پژوهش بررسی‌های گسترده‌ای در خصوص تعیین مقدار تأثیر مشخصات فیزیکی نمونه‌ها بر مقدار شاخص فشردگی و نهایتاً تعیین رابطه‌ای که مقدار شاخص فشردگی را با دقت بیش‌تری پیش‌بینی کند، صورت گرفته است. با توجه به مقادیر جدول مذکور ملاحظه می‌گردد مقدار همبستگی عوامل ترکیبی یعنی مشخصات مرتبط با جنس خاک کم‌تر از ۰/٦ است و از بین آن‌ها حد روانی با ضریب همبستگی معادل ۰/۵۹۳ بیش‌ترین تأثیر را در شاخص فشردگی دارد. در حالی که عوامل محیطی و یا مشخصه‌های مرتبط با ساختمان اولیه‌ی نمونه‌ها شامل رطوبت اولیه‌ی نمونه (ω_0)، نسبت پوکی اولیه (e_0)، وزن واحد حجم خشک (γ_d) تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱ در مقدار شاخص فشردگی دارند. یعنی به احتمال بیش از ۹۹ درصد همبستگی بین آن‌ها وجود دارد. لذا در تحلیل‌های بعدی از این مشخصه‌ها برای استخراج رابطه به‌منظور تعیین شاخص فشردگی استفاده گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در مراجع و هم‌چنین نتایج حاصل از این پژوهش ملاحظه می‌گردد که شاخص فشردگی خاک‌ها تابع دو گروه عمده از عوامل تأثیرگذار هستند که عوامل مرتبط با مشخصات فیزیکی بیانگر ساختمان اولیه‌ی نمونه‌ها مهم‌ترین آن‌ها است.

جدول ۲ مشخصات منحنی فشردگی نمونه‌ها (مقادیر شاخص فشردگی و عرض از مبدأ)

شماره خاک	نسبت پوکی اولیه	مشخصات خط e-LogP		شماره خاک	نسبت پوکی اولیه	مشخصات خط e-LogP		شماره خاک	نسبت پوکی اولیه	مشخصات خط e-LogP	
		عرض از مبدأ	شاخص فشردگی			عرض از مبدأ	شاخص فشردگی			عرض از مبدأ	شاخص فشردگی
۱	۰/۵۰	۰/٦٥۰	۰/۰۹	۱۰	۰/۷٤	۰/۸۸۷	۰/۱۰	۱۹	۰/۷۰	۰/۹۱۲	۰/۱۸
	۰/۸۰	۰/۸۰۰	۰/۱۷		۱/۲۱	۱/۵۷۵	۰/۳۲		۰/۹۷	۱/۲٦۱	۰/۲۵
	۰/۹۰	۱/۰۷۷	۰/۲۲		۱/۵٤	۲/۲۵۵	۰/۵۵		۱/۵۸	۱/٦۳۳	۰/۳٦
۲	۰/٦۰	۰/۷۹۲	۰/۱۲	۱۱	۰/۷۳	۰/۹۸٤	۰/۲۳	۲۰	۰/۵۵	۰/٦٦٤	۰/۰۸
	۰/٦٤	۰/۸۵۲	۰/۱۵		۱/۷۰	۲/۱۹۲	۰/٤۹		۰/٦۵	۰/۷۹۲	۰/۱٤
	۱/۰۲	۱/۰۳۹	۰/۱۸		۱/۸۷	۲/۲۷٦	۰/۵۱		۱/۲۵	۱/۹۳۵	۰/۵۳
۳	۰/٦۰	۰/۷٤۹	۰/۱۰	۱۲	۰/۷۷	۰/۹٤۱	۰/۱٤	۲۱	۰/٦٦	۰/۷۸۵	۰/۱۰
	۰/۷۱	۰/۸۸۱	۰/۱۲		۱/۵۵	۱/۹۹۲	۰/٤۵		۰/۸۵	۱/۰۷۳	۰/۲۱
	۱/۰۷	۱/۲۱۵	۰/۲٤		۱/۹۱	۲/۱۷۷	۰/٤۹		۱/٤۹	۱/٤۹٦	۰/۲۹
٤	۰/۵۵	۰/٦٤٦	۰/۰۷	۱۳	۰/۵٦	۰/٦۹۲	۰/۰۹	۲۲	۰/٤۹	۰/۵۸۳	۰/۰۸
	۰/۸۱	۱/۰۲۲	۰/۱۹		۰/۸۸	۱/۲۰۱	۰/۲۵		۰/۵۲	۰/٦۲۱	۰/۱۰
	۱/۱۳	۱/٦۲۵	۰/۳۸		۱/۲۱	۱/۳٤۹	۰/۲۸		۰/۹۱	۰/۸۹۲	۰/۱٦
۵	۰/۱۳	۰/۱۹۸	۰/۰۸	۱٤	۰/۵۳	۰/٦٤۵	۰/۰۹	۲۳	۰/۵۵	۰/٦۵۱	۰/۰۸
	۰/٤۷	۰/۵٤٤	۰/۰۷		۰/۹۵	۱/۲٤۸	۰/۲۵		۰/٦۷	۰/۸٦٤	۰/۱۵
	۰/٦٦	۰/۸۰۰	۰/۱٤		۱/۱۵	۱/۳٤۸	۰/۳۱		۱/۳۲	۱/۳۳۱	۰/۲٦
٦	۰/۵۷	۰/٦۷۸	۰/۰۹	۱۵	۰/٦٦	۰/۸۰۱	۰/۱۳	۲٤	۰/۵۲	۰/٦۱٤	۰/۰۷
	۰/٦۷	۰/۸٦۲	۰/۱٦		۱/۱۵	۱/٤۰٤	۰/۲۷		۰/۷۱	۰/۸۲۰	۰/۱٤
	۱/۰۷	۱/۱۱۹	۰/۱۸		۱/۵۸	۱/۸۷٤	۰/٤٤		۱/۱۵	۱/۳۷٦	۰/۲۷
۷	۰/۵۲	۰/۵۹۸	۰/۰۸	۱٦	۰/۵۸	۰/۷۵۱	۰/۱۳	۲۵	۰/۵٤	۰/٦۷۵	۰/۱۰
	۰/٦۸	۰/۸٦۸	۰/۱۷		۰/۷۵	۰/۹۱۰	۰/۱۹		۰/٦۳	۰/۸۳۱	۰/۱۸
	۱/۰۲	۱/۱۵۹	۰/۲۱		۱/۱٦	۱/۱٦۸	۰/۲۰		۱/۲۱	۱/۳۳۲	۰/۳۱
۸	۰/۸٦	۱/۰۹٤	۰/۲۱	۱۷	۰/٦۰	۰/۷۲۲	۰/۰۹	۲٦	۰/۵۹	۰/۷۲۰	۰/۱۰
	۱/٦٦	۲/۳۸۰	۰/۵۵		۰/۸۸	۱/۰۹۱	۰/۲٤		۰/۹۵	۱/۰٦٤	۰/۱٦
	۲/٤۳	۲/٤٦۸	۰/٦۰		۱/٤٤	۱/۳۹۹	۰/۲۷		۱/۵۲	۱/۷۷۰	۰/۳٤
۹	۰/٦۸	۰/۸۱۹	۰/۱۰	۱۸	۰/۵۲	۰/٦۱۷	۰/۰۸				
	۱/۰۰	۱/۱٦٤	۰/۱۹		۰/۲۵	۰/٤۳۲	۰/۱۸				
	۱/۳۵	۱/۵۷۷	۰/۲٦		۱/۳۸	۱/۲۲۳	۰/۲۷				

جدول ۳ جدول ضریب همبستگی مشخصات فیزیکی مختلف با یکدیگر و با شاخص فشردگی

	LL	PL	SL	IP	Is	el	gama	w_n	e_0	c_c
LL	1	.835(**)	-.271(*)	.979(**)	.961(**)	.997(**)	-.554(**)	.555(**)	.582(**)	.593(**)
pL	.835(**)	1	-.114	.706(**)	.770(**)	.821(**)	-.480(**)	.464(**)	.476(**)	.485(**)
sL	-.271(*)	-.114	1	-.306(**)	-.527(**)	-.254(*)	.155	-.162	-.138	-.172
IP	.979(**)	.706(**)	-.306(**)	1	.953(**)	.980(**)	-.537(**)	.543(**)	.573(**)	.584(**)
Is	.961(**)	.770(**)	-.527(**)	.953(**)	1	.953(**)	-.534(**)	.537(**)	.553(**)	.573(**)
e_l	.997(**)	.821(**)	-.254(*)	.980(**)	.953(**)	1	-.548(**)	.548(**)	.579(**)	.590(**)
γ_d	-.554(**)	-.480(**)	.155	-.537(**)	-.534(**)	-.548(**)	1	-.970(**)	-.963(**)	-.906(**)
w_n	.555(**)	.464(**)	-.162	.543(**)	.537(**)	.548(**)	-.970(**)	1	.980(**)	.921(**)
e_0	.582(**)	.476(**)	-.138	.573(**)	.553(**)	.579(**)	-.963(**)	.980(**)	1	.914(**)
c_c	.593(**)	.485(**)	-.172	.584(**)	.573(**)	.590(**)	-.906(**)	.921(**)	.914(**)	1

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار است. * همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی دار است.

رطوبت اولیه، نسبت پوکی اولیه و وزن واحد حجم اولیه از جمله عوامل و مشخصات این گروه می‌باشند. در واقع هر سه مشخصه‌ی یادشده دارای ماهیت یکسانی هستند و نشانگر فضای خالی موجود میان ذرات خاک و در نتیجه پتانسیل تحکیم‌پذیری بیش‌تر می‌باشند. به‌طوری‌که اغلب روابط تجربی شده نیز بر اساس این مشخصات هستند. گروه دوم شامل مشخصات مربوط به خواص خمیری خاک‌ها نظیر حد روانی (LL)، دامنه‌ی خمیری (I_p)، شاخص انقباض (I_s)نسبت پوکی در حد روانی (e_L) و نسبت پوکی در حد خمیری (e_p)، می‌شود. ازاین‌رو است که برخی محققان سعی نمودند از روابط دومتغیره یا چندمتغیره که شامل گروه‌های مختلف تأثیرگذار باشند، استفاده نمایند. در این پژوهش سعی گردید در بررسی‌ها و تحلیل‌های صورت‌گرفته از هر دو گروه عوامل استفاده گردد. بدین منظور از مشخصه حد روانی به عنوان نماینده عوامل ترکیبی و از مشخصه‌های رطوبت، نسبت پوکی و وزن واحد حجم خشک به عنوان نمایندگان عوامل محیطی استفاده گردیده است. بدین صورت که آنالیز رگرسیون خطی یک متغیره مختلفی بین شاخص فشردگی (C_C)و شرایط اولیه نمونه شامل رطوبت اولیه نمونه (ω_n) ، نسبت پوکی اولیه (e_0) و وزن واحد حجم خشک (γ_d) و حد روانی (LL) و همچنین روابط دو متغیره به صورت ترکیب یکی ازمتغیرهای مربوط به شرایط اولیه نمونه و حد روانی انجام گردید. مدل‌های بدست آمده از آنالیز رگرسیون انجام شده با استفاده از نرم افزارSPSS به ازای هر یک از مشخصه‌ها و هم‌چنین مشخصات آماری آن‌ها مطابق جدول (٤) ارائه شده است.

با توجه به جدول (٤) ملاحظه می‌گردد که به‌جز رابطه‌ی شماره‌ی شماره E-4 که تنها متکی بر حد روانی است، سایر روابط در سطح کم‌تر از ۰/۰۱ معنی‌دارند و از ضریب تبیین بزرگ‌تری(r^2) نیز برخوردار هستند. البته از میان آن‌ها روابط شماره‌ی E-3 وE-7 دارای کم‌ترین مقدار شاخص مجذور خطای میانگین مربعات RMSE و بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین هستند و در مقایسه با سایر مدل‌ها مقدار شاخص فشردگی را به‌تر تخمین می‌زنند. مجذور خطای

میـــانگین مربعـــات (Root Mean Square Error) شاخصی است که مقدار نزدیکی مقادیر برآورد شده به مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. این شاخص مطـابق رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\left(C_{Cest} - C_{Cdet}\right)^2} \qquad (۲)$$

کـه در رابطـه مـذکور C_{Cdet} شـاخص فشـردگی حاصل از نتایج آزمایشگاهی، C_{Cest} شـاخص فشـردگی تخمین زده شده و n تعداد نمونه های آماری است.

به روشنی می‌توان نتیجه گرفت که روابط مبتنی بر شرایط فیزیکی اولیه نظیر نسبت پوکی، دانسیته‌خشک و رطوبت که همگی به‌نوعی بیانگر فاصله‌ی ذرات خـاک از یکدیگر و نهایتاً پتانسیل نشست هستند، در تخمـین مقدار شاخص فشـردگی از کـارایی خـوبی برخـوردار هستند. هم‌چنین روابطی کـه تنهـا مبتنـی بـر جـنس و خواص ذرات ریزدانه (نظیر حـدود اتربـرگ) و بـدون توجه به تخلخل اولیه آن‌ها می‌باشد (رابطه‌ی شـماره‌ی E-4) از نظر آماری معنی‌دار نیستند و قادر بـه تخمـین درست شاخص فشردگی نمی‌باشند. هـم‌چنـین از بـین مشخصـــه‌هـای مـؤثر در مقـدار شـاخص فشـردگی، مشخصـه‌هـای مربـوط بـه تخلخـل اولیـه‌ی نمونـه‌هـا (رطوبت، نسبت پوکی، دانسیته خشک و...) از نظر معیارهای آماری بسیار شبیه هـم مـی‌باشـند و از دقـت قابل قبولی هم برخوردار هستند. به‌منظور انتخاب یکی از روابط فوق به‌عنوان رابطـه‌ی برتـر (از نظـر دقـت و سادگی) تحلیـل دیگـری نیـز بـا اسـتفاده از داده‌هـای آزمایشگاهی مستقلی که در بسـط روابـط فـوق نقـش نداشته‌اند صورت گرفت. بـدین منظـور بـا اسـتفاده از داده‌هـای ارائـه‌شـده در مرجـع [7] مقـادیر شـاخص فشردگی بر اسـاس روابـط ارائـه‌شـده در جـدول (٤) محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی آن‌ها مقایسه گردیدنـد. بر اساس نتایج حاصل از این بررسی‌ها مشخص گردید که رابطه‌ی پیشنهادی *E-3* که یک رابطه‌ی تک‌متغیـری و بـر اسـاس وزن واحـد حجـم خشـک اسـت، دارای کم‌ترین مقدار RMSE می‌باشد. این مدل تجربی که بـا در نظر گرفتن دقت دو رقـم اعشـار بـه‌شـرح رابطـه‌ی شماره‌ی (۳) معرفی می‌گردد، هم بـه لحـاظ سـادگی و هم به‌خاطر دقت بیشتر سبت به سایر روابط ارائـه‌شـده در جدول (٤)، به‌عنوان رابطه‌ی‌برتر انتخاب گردید.

$$C_c = -0.46\gamma_d + 0.88 \qquad (۳)$$

به روش مشابهی رابطه‌ی خطی یک متغیره‌ای نیز بـرای تعیین عرض از مبدأ منحنی فشردگی (خـط فشـردگی) به شرح معادله‌ی (۳) تعیین گردید.

$$e_1 = -1.78\gamma_d + 3.70 \qquad (٤)$$

جدول ٤ مشخصات روابط استخراج شده در این پژوهش برای کل نمونه‌ها

شماره‌ی مدل	مشخصه‌ی مورد استفاده	رابطه‌ی پیشنهادی	ضریب همبستگی (r^2)	مقدار RMSE
E-1	e_0	$C_c = 0.286e_0 - 0.054$	۰/۸۳٦	۰/۰۵۳٤۱۷
E-2	ω_i	$C_c = 0.008\omega_i - 0.044$	۰/۸٤۸	۰/۰۵۱۷۲
E-3	γ_d	$C_c = -0.461\gamma_d + 0.883$	۰/۸۲۰	۰/۰۵۵۷۳۱
E-4	LL	$C_c = 0.007LL - 0.043$	۰/۳۵۱	۰/۱۰۷۳۷۸
E-5	e_0 & LL	$C_c = 0.269e_0 + 0.001LL - 0.078$	۰/۸٤۱	۰/۰۵۲٤۷۱
E-6	ω_i & LL	$C_c = 0.007\omega_i + 0.001LL - 0.077$	۰/۸۵۸	۰/۰۵٤۳۹
E-7	γ_d & LL	$C_c = -0.424\gamma_d + 0.001LL + 0.773$	۰/۸۳۲	۰/۰۵٦۹٤۸

بر خلاف شیب خط فشردگی یعنی C_C که مستقل از بعد تنش مؤثر است، مقدار عرض از مبدأ (e_1) خط فشردگی که از نظر فیزیکی برابر نسبت پوکی به‌ازای تنش مؤثر معادل یک است، بستگی به واحد مورد استفاده برای تنش مؤثر دارد. رابطه‌ی شماره‌ی (٤) برای حالتی که واحد تنش کیلو پاسکال است بسط داده شده است. بدین ترتیب معادله‌ی عمومی منحنی فشردگی و یا رفتار فشردگی خاک‌های رسی با قرار دادن روابط (٤ و ٣)در معادله‌ی شماره‌ی (١) به‌شرح زیر تعیین گردید:

$$e = [-1.78\gamma_d + 3.7] - [-0.461\gamma_d + 0.883]\log p \qquad (٥)$$

در رابطه‌ی اخیر γ_d وزن واحد حجم خشک اولیه‌ی نمونه بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و مقدار تنش بر حسب کیلو پاسکال می‌باشد. رابطه‌ی (٥) بدان معنی است که با تعیین وزن واحد حجم خشک اولیه‌ی نمونه‌ی خاک، می‌توان منحنی بیانگر پتانسیل فشردگی خاک موسوم به منحنی فشردگی را برآورد نمود. هم‌چنین شاخص فشردگی خاک (C_C) با استفاده از رابطه‌ی (٣) قابل تعیین است. رابطه‌ی شماره‌ی (٣) در مقایسه با روابط مشابه موجود جدول (٦) علاوه بر سادگی و دقت بیش‌تر، از یک ویژگی دیگری نیز برخوردار است. تعیین کمیت مورد استفاده در رابطه‌ی مذکور (وزن واحد حجم خشک) برخلاف سایر کمیت‌های فیزیکی نظیر حد روانی (LL)، شاخص انقباض (I_s)، چگالی ذرت جامد خاک (G_s)، نسبت پوکی (e) و ... نسبتاً ساده بوده و آزاد از خطاهای اندازه‌گیری است. اصولاً تعیین دانسیته خشک برای یک نمونه خاک به‌راحتی و با تعیین وزن، حجم و رطوبت نمونه قابل انجام است. البته دانسیته خشک علی‌رغم سادگی تعیین آن به‌طور غیرمستقیم بیانگر سایر ویژگی‌های خاک نیز می‌باشد. به‌عبارتی دیگر با لحاظ نمودن مقدار دانسیته خشک در تعیین شاخص فشردگی در حقیقت سایر ویژگی‌ها نیز به‌طور ضمنی در آن لحاظ می‌گردند.

ارزیابی کارایی روش‌های تجربی موجود و صحت رابطه‌ی جدید ارائه‌شده

با توجه به این‌که اغلب روابط تجربی پیشنهادشده در مراجع برای تعیین شاخص فشردگی است، لذا در این قسمت رابطه‌ی شماره‌ی (٣) که برای تعیین شاخص فشردگی است، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برای ارزیابی صحت رابطه‌ی پیشنهادشده در این تحقیق و هم‌چنین مقایسه‌ی آن با روابط سایر محققان، از داده‌های ارائه‌شده در مرجع (پارک وکوموتو، ٢٠٠٤) مطابق جدول (٥) استفاده گردید. بدین منظور ضریب فشردگی های مورد استفاده در مرجع یادشده، براساس روش پیشنهادی این تحقیق و هم‌چنین چند مورد از روش‌های موجود در این خصوص برآورد شدند و با مقادیر آزمایشگاهی آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفتند. روابط تجربی مورد استفاده برای انجام این مقایسه در جدول (٦) ارائه شده است.

مقادیر شاخص فشردگی برآوردشده براساس روش‌های تجربی مختلف و مقادیر شاخص فشردگی محاسبه‌شده براساس نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های ارائه شده توسط پارک وکوموتو [11] در جدول شماره (٧) ارائه‌شده است. شکل شماره‌ی (٥-٣) مقادیر شاخص فشردگی تعیین‌شده (از آزمایش) و تخمین‌شده را به‌ترتیب براساس روش‌های تجربی یک‌متغیره مبتنی بر نسبت پوکی و رطوبت اولیه و هم‌چنین روابط دومتغیره را به‌صورت ترسیمی نشان می‌دهد. خط 1:1 ارائه‌ی شده در این شکل‌ها خط فرضی و مکان هندسی نقاطی است که مقادیر محاسبه شده و تخمین‌شده‌ی برابر هستند. لذا وضعیت نقاط نسبت به این خط مقدار دقت روش را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که هر چه نقاط تخمین زده‌شده به این خط نزدیک‌تر باشند از دقت بیش‌تری برخوردار خواهند بود.

البته این نوع مقایسه، به‌صورت کیفی می‌باشد و برای مقایسه‌ی کمی و دقیق روش‌ها لازم است از شاخص‌های آماری مناسبی استفاده گردد. بدین منظور و با توجه به ماهیت مسأله از شاخص مجذور خطای میانگین مربعات (RMSE) استفاده گردید. لذا در این پژوهش به‌منظور تعیین روش برتر مقادیر شاخص RMSE به‌ازای هر یک از روش‌ها با استفاده از رابطه‌ی شماره‌ی (۵) محاسبه گردید که نتایج به‌دست آمده در سطر آخر جدول (۷) ارائه شده است.

با توجه به مقادیر RMSE محاسبه شده به‌ازای هر یک از روش‌های مورد مقایسه (سطر آخر جدول (۷))، ملاحظه می‌گردد روش پیشنهادی این تحقیق دارای کم‌ترین مقدار شاخص مذکور (۰/۰٦۰۱) می‌باشد و در مقایسه با سایر روش‌ها از قابلیت پیش بینی و کارایی بیش‌تری برخوردار است. همچنین روش‌های آزوز، هوف و برلند به‌ترتیب در رده‌های بعدی از این منظر و بر اساس شاخص ذکرشده می‌باشند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به مجموعه مباحث مطرح‌شده همچنین نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان موارد و نکات زیر را جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نمود: نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که منحنی تغییرات نسبت پوکی به‌ازای تنش مؤثر در مقیاس نیمه لگاریتمی برای خاک‌های رسی نرم تحکیم‌نیافته و یا عادی تحکیم یافته همواره خطی است و تنها ضرایب این خط تابعی از مشخصات خمیری و تخلخل اولیه‌ی نمونه می‌باشند. این نتیجه‌گیری با نتایج تحقیقات قبلی نیز مطابقت دارد.

هرچه رطوبت و یا نسبت پوکی اولیه‌ی نمونه آزمایشی بیش‌تر باشد، شاخص فشردگی (C_c) و مقدار نسبت پوکی به‌ازای تنش مؤثر واحد (e_1) نیز افزایش می‌یابند. همچنین خاصیت خمیری خاک در مقدار این ضرایب مؤثر است به‌طوری‌که با افزایش حد روانی خاک، مقادیر این ضرایب نیز افزایش می‌یابند.

جدول ۵ مشخصات نمونه‌های مورد استفاده برای صحت سنجی [11]

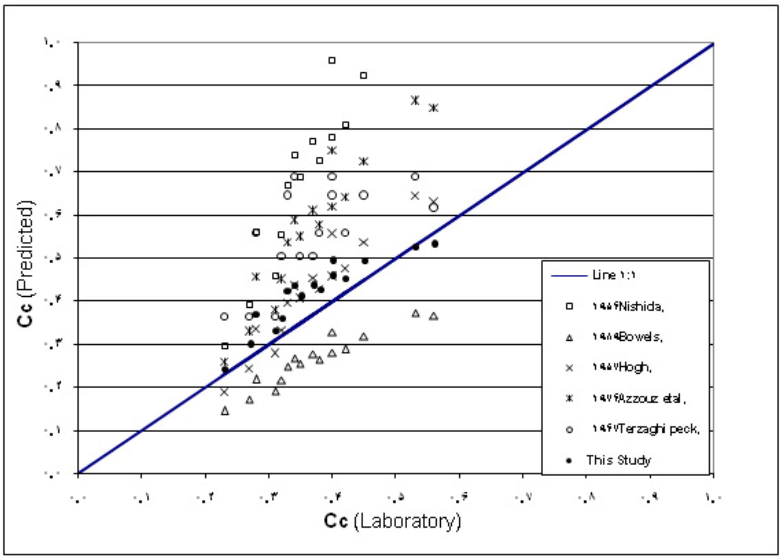
C_c	n_0	e_0	ω_0	ρ_s	I_p	ω_L	نوع خاک
۰/۳۲	۵۷/۹۳	۱/۳۷۷	٤۹/۹	۲/٦۷٦	۳۲/۳	٦٦	Kaolinite
۰/۳۵	٦۱/۹۲	۱/٦۲٦	۵۸/۳	۲/٦۷٦	۳۲/۳	٦٦	
۰/۳۷	٦۳/۹۸	۱/۷۷٦	٦٦/۱	۲/٦۷٦	۳۲/۳	٦٦	
۰/۲۳	٤۷/۲٦	۰/۸۹٦	۳۱/۵	۲/٦۱۸	۳۲/۸	۵۰/٤	Karatsu clay
۰/۲۷	۵۱/۸۱	۱/۰۷۵	٤۰/۷	۲/٦۱۸	۳۲/۸	۵۰/٤	
۰/۳۱	۵٤/۵۵	۱/۲	٤۵/٤	۲/٦۱۸	۳۲/۸	۵۰/٤	
۰/۲۸	۵۸/۱۲	۱/۳۸۸	۵۳/۱	۲/٦۳۸	۳٤/۸	۷۲/۱	M1-a
۰/۳۸	٦۲/۸۸	۱/٦۹٤	٦۰/۸	۲/٦۳۸	۳٤/۸	۷۲/۱	
۰/٤۲	٦٤/۹۲	۱/۸۵۱	٦۷/۷	۲/٦۳۸	۳٤/۸	۷۲/۱	
۰/۳۳	٦۱/۳۹	۱/۵۹	۵٦/۲	۲/۵۵٦	۳۹/۷	۸۱/۷	M2-b
۰/٤	٦٤/۲۳	۱/۷۹٦	٦۵/۸	۲/۵۵٦	۳۹/۷	۸۱/۷	
۰/٤۵	٦۷/۳۱	۲/۰۵۹	۷۸/٤	۲/۵۵٦	۳۹/۷	۸۱/۷	
۰/۳٤	٦۳/۲۵	۱/۷۲۱	٦۱/۲	۲/٦۱٦	٤۲/۳	۸٦/٦	M3-c
۰/٤	٦۷/۹۸	۲/۱۲۳	۷٦/۹	۲/٦۱٦	٤۲/۳	۸٦/٦	
۰/۵۳	۷۰/۷۲	۲/٤۱۵	۸۹/۲	۲/٦۱٦	٤۲/۳	۸٦/٦	
۰/۵٦	۷۰/۳۳	۲/۳۷	۹۳/۳	۲/۵٤۳	٤۷/۵	۷۸/٦	Ariake clay (Kubota)

جدول ٦ روابط تجربی مورد استفاده برای تخمین ضریب فشردگی خاک‌های رسی (نقل از Ozer et al, 2008)

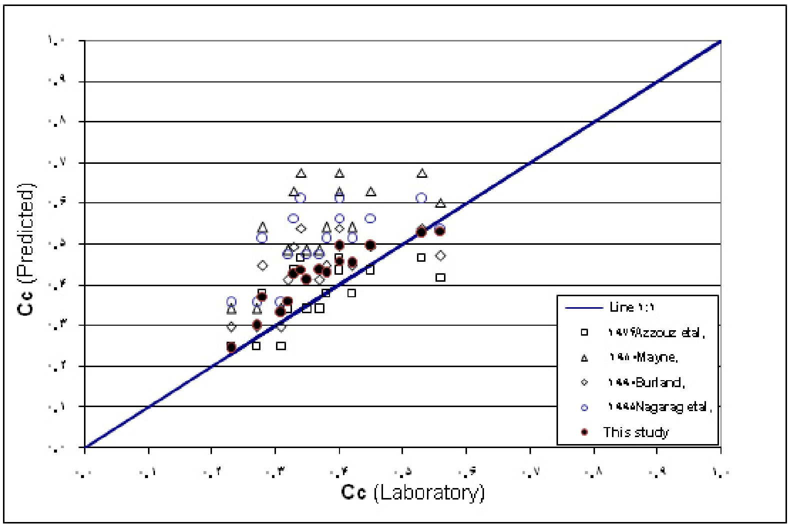
مرجع	رابطه
Azzouz et al. (1976)	$C_c = 0.40\,(e_o - 0.25)$
Hough (1957)	$C_c = 0.30\,(e_o - 0.27)$
Bowles, 1989	$C_c = 0.15e_0 + 0.0107$
Nishida (1956)	$C_c = 0.54\,(e_o - 0.35)$
Azzouz et al. (1976)	$C_c = 0.006\,(w_L - 9)$
Mayne (1980)	$C_c = (w_L - 13)/109$
Terzaghi and Peck (1967)	$C_c = 0.009\,(w_L - 10)$
Burland ,1990	$C_c = 0.256e_L - 0.04$
Nagaraj et al, 1995	$C_c = 0.27e_L$
Azzouz et al. 2 (1976)	$C_c = 0.37\,(e_o + 0.003w_L - 0.34)$
Al-Khafaji and Andersland (1992)	$C_c = -0.156 + 0.411e_o + 0.00058w$
Koppula (1981)	$C_c = 0.009w_n + 0.005w_L$
Park & Koumoto ,2004	$C_c = 0.302(e_0 - e_p) + 0.064$

جدول ۷ مقادیر شاخص فشردگی برآورد شده بر اساس روش‌های تجربی مختلف و نتایج آزمایشگاهی [11]

	روابط یک‌متغیره (نسبت پوکی)					روابط یک‌متغیره (رطوبت اولیه)				روابط دومتغیره				رابطه
شاخص فشردگی Cc	Nishida, 1956	Bowels, 1989	Hogh, 1957	Azzouz etal, 1976	Terzaghi &peck, 1967	Azzouz etal, 1976	Mayne, 1980	Burland 1990	Nagarag etal 1995	Azzouz etal, 1976	Al-Khafaji 1992	Park 2004	Koppula, 1981	پیشنهادی این تحقیق
۰/۳۲	۰/۵۵	۰/۲۲	۰/۳۳	۰/٤۵	۰/۵۰	۰/۳٤	۰/٤۹	۰/٤۱	۰/٤۸	۰/٤۷	۰/٤۳	۰/۲۱	۰/۷۸	۰/۳۳
۰/۳۵	۰/٦۹	۰/۲۵	۰/٤۱	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۳٤	۰/٤۹	۰/٤۱	۰/٤۸	۰/۵۷	۰/۵۳	۰/۲۸	۰/۸۵	۰/۳۸
۰/۳۷	۰/۷۷	۰/۲۸	۰/٤۵	۰/٦۱	۰/۵۰	۰/۳٤	۰/٤۹	۰/٤۱	۰/٤۸	۰/٦٤	۰/۵۹	۰/۳۳	۰/۹۲	۰/٤۱
۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۲٦	۰/۳٦	۰/۲۵	۰/۳٤	۰/۳۰	۰/۳٦	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۰	۰/۵٤	۰/۲۱
۰/۲۷	۰/۳۹	۰/۱۷	۰/۲٤	۰/۳۳	۰/۳٦	۰/۲۵	۰/۳٤	۰/۳۰	۰/۳٦	۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۲۵	۰/٦۲	۰/۲۷
۰/۳۱	۰/٤٦	۰/۱۹	۰/۲۸	۰/۳۸	۰/۳٦	۰/۲۵	۰/۳٤	۰/۳۰	۰/۳٦	۰/٤۰	۰/۳۵	۰/۲۹	۰/٦٦	۰/۳۰
۰/۲۸	۰/۵٦	۰/۲۲	۰/۳٤	۰/٤٦	۰/۵٦	۰/۳۸	۰/۵٤	۰/٤۵	۰/۵۱	۰/٤۸	۰/٤٤	۰/۱۹	۰/۸٤	۰/۳٤
۰/۳۸	۰/۷۳	۰/۲٦	۰/٤۳	۰/۵۸	۰/۵٦	۰/۳۸	۰/۵٤	۰/٤۵	۰/۵۱	۰/٦۰	۰/۵٦	۰/۲۸	۰/۹۱	۰/٤۰
۰/٤۲	۰/۸۱	۰/۲۹	۰/٤۷	۰/٦٤	۰/۵٦	۰/۳۸	۰/۵٤	۰/٤۵	۰/۵۱	۰/٦۷	۰/٦۳	۰/۳۳	۰/۹۷	۰/٤۲
۰/۳۳	۰/٦۷	۰/۲۵	۰/٤۰	۰/۵٤	۰/٦۵	۰/٤٤	۰/٦۳	۰/٤۹	۰/۵٦	۰/۵٦	۰/۵۳	۰/۲۲	۰/۹۱	۰/٤۰
۰/٤۰	۰/۷۸	۰/۲۸	۰/٤٦	۰/٦۲	۰/٦۵	۰/٤٤	۰/٦۳	۰/٤۹	۰/۵٦	۰/٦٤	۰/٦۱	۰/۲۸	۱/۰۰	۰/٤۳
۰/٤۵	۰/۹۲	۰/۳۲	۰/۵٤	۰/۷۲	۰/٦۵	۰/٤٤	۰/٦۳	۰/٤۹	۰/۵٦	۰/۷۵	۰/۷۱	۰/۳٦	۱/۱۱	۰/٤۷
۰/۳٤	۰/۷٤	۰/۲۷	۰/٤٤	۰/۵۹	۰/٦۹	۰/٤۷	۰/٦۸	۰/۵٤	۰/٦۱	۰/٦۱	۰/۵۸	۰/۲۳	۰/۹۸	۰/٤۱
۰/٤۰	۰/۹٦	۰/۳۳	۰/۵٦	۰/۷۵	۰/٦۹	۰/٤۷	۰/٦۸	۰/۵٤	۰/٦۱	۰/۷۸	۰/۷٤	۰/۳٦	۱/۱۳	۰/٤٦
۰/۵۳	۱/۱۲	۰/۳۷	۰/٦٤	۰/۸۷	۰/٦۹	۰/٤۷	۰/٦۸	۰/۵٤	۰/٦۱	۰/۹۰	۰/۸٦	۰/٤٤	۱/۲٤	۰/۵۰
۰/۵٦	۱/۰۹	۰/۳۷	۰/٦۳	۰/۸۵	۰/٦۲	۰/٤۲	۰/٦۰	۰/٤۷	۰/۵٤	۰/۸۹	۰/۸٤	۰/۵٤	۱/۲۳	۰/۵۰
RSME	۰/۳۷۹۲	۰/۱۱۲۹	۰/۰۷٤۳	۰/۲۲۱۸	۰/۲۰٤۱	۰/۰٦۸۳	۰/۱۸۹۷	۰/۰۹۹٤	۰/۱۵۳۹	۰/۲٤۷۰	۰/۲۱۱۷	۰/۰۸۰٦	۰/۵٦۱۱	۰/۰٦۰۱

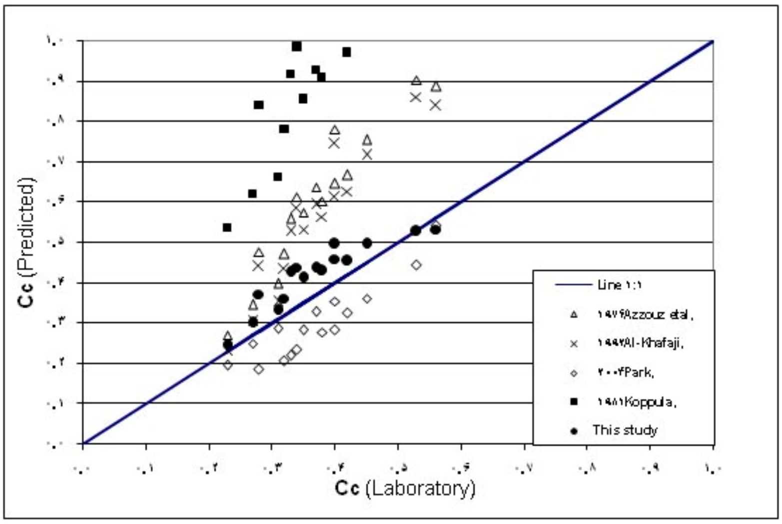


شکل ۳ مقایسه‌ی دقت روابط یک‌متغیره بر اساس نسبت پوکی اولیه در برآورد شاخص فشردگی



شکل ٤ مقایسه‌ی دقت روابط یک‌متغیره بر اساس رطوبت اولیه در برآورد شاخص فشردگی

مقدار همبستگی شاخص فشردگی با مشخصه‌های مرتبط با ساختمان اولیه نمونه‌ها به‌مراتب بیش‌تر از مقدار همبستگی آن با مشخصات مرتبط با جنس ذرات نظیر خواص خمیری خاک است. به‌عبارت دیگر روابط مبتنی بر شرایط ساختمان اولیه نظیر نسبت پوکی، دانسیته خشک و رطوبت که همگی به‌نوعی بیانگر فاصله‌ی ذرات خاک از یکدیگر و نهایتاً پتانسیل نشست هستند، در تخمین مقدار شاخص فشردگی از کارایی بیش‌تری برخوردار هستند. هم‌چنین روابطی که تنها مبتنی بر جنس و خواص ذرات ریزدانه (نظیر حدود اتربرگ) و بدون توجه به تخلخل اولیه‌ی آن‌ها می‌باشند، از نظر آماری معنی‌دار نیستند و قادر به تخمین درست شاخص فشردگی نمی‌باشند.



شکل ۵ مقایسه‌ی دقت روابط دومتغیره در برآورد شاخص فشردگی

با استفاده از تحلیل رگرسیونی صورت گرفته بر نتایج و داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش، یک رابطه‌ی یک‌متغیره بر اساس وزن واحد حجم خشک برای برآورد شاخص فشردگی به شرح زیر پیشنهاد گردید.

$$C_c = -0.46\gamma_d + 0.88$$

هم‌چنین رابطه‌ی یک متغیره‌ی خطی دیگری نیز برای برآورد خط فشردگی(منحنی فشردگی) با استفاده از وزن واحد حجم خشک پیشنهاد گردید.

براساس ارزیابی‌های صورت‌گرفته با شاخص‌های آماری و با استفاده از داده‌های ارائه‌شده در مراجع مشخص گردید که روش پیشنهادی این تحقیق برای تعیین شاخص فشردگی از دقت و کارایی بیش‌تری برخوردار است. هم‌چنین روش‌های پیشنهادی آزوز، هوف و برلند از این منظر در رده‌ی بعدی قرار دارند.

پیشنهاد می‌گردد تحقیق مشابهی بر نمونه‌های دست‌نخورده و طبیعی انجام گردد.

در پژوهش‌های آتی اثر تنش پیش‌تحکیمی در مقدار شاخص فشردگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

مراجع

1. .Lambe, T.W. and Whitman, R.V., "Soil Mechanics", John Wiley & Sons, New York, (1969).
2. Burland, J. B., "On the compressibility and shear strength of natural soils", Geotechnique, 40(3), pp.329-378,(1990).
3. Tsuchida, T. A., "new concept of e-Logp relationship for clays", *Proce,9th Asian regional Conference on soil mechanics and foundation Engineering*, Bangkok, and Vol (1), pp. 87-90, (1991).
4. Sridharan, A. and Nagaraj HB., "Compressibility behaviour of remoulded, fine-grained soils and correlation with index properties", Can Geotech J., 37(3), pp. 712–722, (2000).
5. Sridharan, A and prakash, K., "Limitting Compression Curves", *Geotechnical Testing Journal*.,

24(3), pp. 330-333, (2001).

6. Bo, M.W. and Sin, W.K. and Chao, V. and Ing, T.H., "Compression test of ultra-soft soil using hydraulic consolidation cell", *Geotechnical Testing Journal*., 26(3), pp. 1-10, (2003).
7. Abbasi, N. and Rahimi, H. and Javadi, A. and Fakher, A., "Finite difference approach for consolidation with variable compressibility and permeability", *Journal of Computers and Geotechnics*., 34(1), pp. 41-52, (2007).
8. Lekha, K.R., and Krishnaswamy, N.R. and Basak, P., "Consolidation of clays for variable permeability and compressibility", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering., 129(11), pp. 1001-1009, (2003).
9. Yoon. G.L. and Kim, B.T. and Jeon, S.S., "Empirical correlations of compression index for marine clay from regression analysis", *Can Geotech J*., 41(6), pp. 1213–1221, (2004).
10. Cerato B. and Alan L., "Determining intrinsic compressibility of fine grained soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*., 130 (8), pp. 872-877, (2004).
11. Park, J. H. and koumoto, T., "New compression index equation", *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*., 130 (2), pp. 223-226, (2004).
12. Nath, A. and DeDalal., "The role of plasticity index in predicting compression behaviour of clays", *Journal of Geotechnical Engineering*., EJGE, Ppr0466, (2004).
13. Rao, k. and Reddy, P. and Rani, Ch., "Approprite Parameters for prediction of compression index", *Electronical Journal of Geotechnical Engineering*., EJGE, Ppr0628, (2006).
14. Ozer, M. and Nihat, I. and Mehmet, O., "Statistical and neural network assessment of the compression index of clay-bearing soils", Bulletin of Engineering Geology and the Environment. The official journal of the IAEG., 10.1007/s10064-008-0168-8, (2008).
15. Azzouz, A. and Krizek, S. and Corotis, R.B., "Regression analysis on soil compressibility", Soils Foundation.,16(2), pp. 19-29, (1976).
16. Anon, Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.08, Soil and Rock, D420-D5779, (2000).